

## Изменение реологических свойств высоковязкой структурированной нефти при ультразвуковой обработке

И.Н. Евдокимов, Н.Ю. Елисеев,\* А.А. Фесан

*Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина,  
факультет разработки нефтяных и газовых месторождений,  
кафедра физики, Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-кт, д. 65, корп. 1*

(Статья поступила 14.11.2014; Подписана в печать)

В ходе исследований проводилась кратковременная и длительная ультразвуковая обработка образцов высоковязкой структурированной нефти с содержанием асфальтенов 15–16%. Результаты измерений и расчетов при кратковременной ультразвуковой обработке высоковязкой нефти показывают, что на реологических зависимостях есть интервалы скоростей сдвига, в которых наблюдаются уменьшение или возрастание вязкости. Длительная ультразвуковая обработка не приводит к качественным изменениям коллоидно-дисперсной структуры. После ультразвуковой обработки структурированной нефти могут наблюдаться как положительные эффекты (снижение вязкости) так и отрицательные последствия (увеличение вязкости, выпадение осадков, кольматация порового пространства пласта). Для каждого конкретного случая (индивидуальный тип нефти, пластовые условия, мощность источника ультразвука) необходимо определять свое оптимальное время обработки, обеспечивающее достижение максимального положительного эффекта.

PACS: 43.25.+y

УДК: 534.8.081.7: 553.982.22

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, высоковязкая структурированная нефть, асфальтены, коллоидно-дисперсная структура.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы резко возросло количество коммерческих предложений оборудования и технологий ультразвуковой обработки добываемых нефтей. В связи с этим может возникнуть представление о том, что механизмы и последствия подобной обработки уже достаточно хорошо изучены. На самом деле, как в отечественных, так и в зарубежных публикациях приводятся результаты лишь ограниченного числа соответствующих исследований.

Следует иметь в виду, что механизмы специфического воздействия ультразвуковых колебаний на молекулярно-коллоидные структуры нефти являются основными лишь при малых мощностях облучения. При больших мощностях главными становятся неспецифические механизмы перехода энергии ультразвука в тепловую энергию, т. е. дополнительный прогрев нефти, а также кавитационные процессы, результатом которых может быть разрыв связей в молекулах углеводородов, т. е. нежелательное изменение химического состава нефти.

На сегодняшний день, хорошо обоснованным можно считать лишь качественный вывод о том, что маломощная ультразвуковая обработка нефтей заметно изменяет характеристики коллоидных систем асфальтенов [1, 2] и парафинов [3]. При этом, в зависимости от типа нефти и условий обработки, размеры коллоидных частиц могут как уменьшаться, так и увеличиваться; связи между этими частицами могут ослабевать и уси-

ливаться. Соответственно, после ультразвуковой обработки нефти могут наблюдаться как положительные эффекты (снижение вязкости) так и отрицательные последствия (увеличение вязкости, выпадение осадков, кольматация порового пространства пласта). Для каждого конкретного случая (индивидуальный тип нефти, пластовые условия, мощность источника ультразвука) существует свое оптимальное время обработки, обеспечивающее достижение максимального положительного эффекта.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Объектом наших исследований являлась высоковязкая нефть со скв. 238 ООО «Татнефть-Самара», обогащенная асфальтенами, содержание которых составляет 15–16%. Обработка исследуемой высоковязкой нефти проводилась с использованием маломощной ультразвуковой ванны СТ-400А (СТ Brand Inc.), потребляемая мощность — 35 Вт, частота ультразвука — 43–45 кГц. В описываемых ниже лабораторных реологических исследованиях был использован ротационный вискозиметр Rheotest® RN4.1 (MessgeräteMedingen GmbH).

Проведенные нами исследования показали, что в исследуемой высоковязкой нефти наблюдается термически индуцированный переход [4, 5], который имеет пороговый характер. В связи с этим, температура фазового перехода  $T_c$  является важной характеристикой структурно-механических свойств нефти.

В связи с описанными выше причинами, диапазон скоростей сдвига, общий для всего исследованного интервала температур, был ограничен значениями  $\dot{\gamma} = 0,04$  1/с и  $\dot{\gamma} = 5,0$  1/с. С целью выявления темпера-

\*E-mail: eliseev@gubkin.ru

туры структурного фазового перехода, для обоих граничных значений  $\dot{\gamma}$  были рассчитаны величины максимальной эффективной вязкости  $(\eta_{\text{эфф}})_{\text{макс}} = \tau_0/\dot{\gamma}$ , соответствующие «начальным» структурным состояниям потока, наименее подверженным механическому воздействию. Соответствующие графики приведены на рис. 1. В связи с большим диапазоном изменений  $\eta_{\text{эфф}}$ , для представления этого параметра использована логарифмическая шкала. Данные рис. 1 отчетливо показывают наличие двух четко различимых участков на температурных зависимостях  $\ln(\eta_{\text{эфф}})$  для обеих скоростей сдвига.

В области повышенных температур, где структурно-механические свойства нефти были отождествлены как «жидкоподобные», наблюдается относительно медленное возрастание логарифма вязкости с уменьшением температуры. Для обоих значений  $\dot{\gamma}$  соответствующие последовательности экспериментальных данных с высокой точностью ( $R^2 \approx 1,00$ ) могут быть аппроксимированы линейными функциями (красные прямые на рис. 1).

С другой стороны, при пониженных температурах (для «твердоподобных» гелевых структур нефти) рассматриваемые температурные зависимости становятся более крутыми. При этом данные для  $\dot{\gamma} = 5,01/\text{с}$  по-прежнему могут быть аппроксимированы линейной функцией (синяя прямая на рисунке). Данные же для  $\dot{\gamma} = 0,041/\text{с}$  демонстрируют гораздо более быстрое изменение, и для их аппроксимации пришлось использовать полином 3-й степени (синяя кривая на рисунке).

Температура обсуждаемого структурного фазового перехода в исследованной нефти  $T_c$  была отождествлена с точкой пересечения низкотемпературных (синих) и высокотемпературных (красных) аппроксимаций данных на рис. 1. Как видно из рисунка, определяемая таким способом величина  $T_c$  увеличивается при уменьшении скорости сдвига, использованной для получения рассматриваемой последовательности данных ( $T_c \approx 26,5^\circ\text{C}$  для  $\dot{\gamma} = 5,01/\text{с}$  и  $T_c \approx 27,5^\circ\text{C}$  для  $\dot{\gamma} = 0,041/\text{с}$ ). Подобное поведение является, очевидно, следствием возмущающего действия механической энергии потока.

Воздействие ультразвуком малой мощности производилось на протяжении 5 минут при комнатной температуре ( $24^\circ\text{C}$ ). Реологические исследования обработанного образца и контрольного образца исходной нефти проводили при  $45^\circ\text{C}$  (в условиях существования «жидкоподобной» структуры исходной нефти).

Кратковременная ультразвуковая обработка не приводит к *качественным* изменениям структурно-механических свойств нефти. Наличие осцилляционного характера тиксотропии при малых  $\dot{\gamma}$  (0,8 и 3,0 1/с) в обоих образцах свидетельствует о сохранении связнодисперсной «жидкоподобной» структуры. Отсутствуют также принципиальные различия в процессах перехода к свободнодисперсной структуре микрогелевых частиц при больших  $\dot{\gamma}$  (50 и 120 1/с).

В то же время, наши данные показывают, что да-

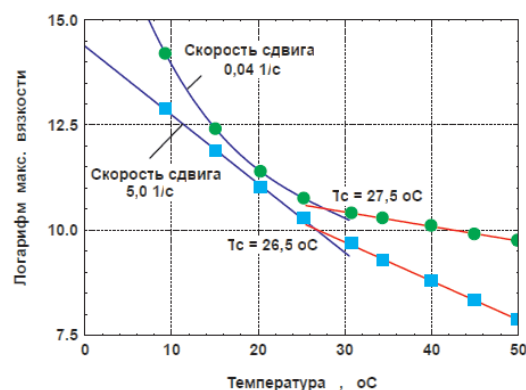


Рис. 1: Приближенные оценки температуры структурного фазового перехода в нефти по результатам реологических исследований

же кратковременная ультразвуковая обработка приводит к *количественным* изменениям вязкости нефти. При этом наблюдаемые величина и знак этих изменений определяются конкретным значением скорости сдвига в потоке. С целью более наглядной иллюстрации количественных эффектов, для каждого значения  $\dot{\gamma}$  были рассчитаны максимальные эффективные вязкости  $(\eta_{\text{эфф}})_{\text{макс}} = \tau_0/\dot{\gamma}$ , а также относительное изменение этого параметра после ультразвуковой обработки. Результаты расчетов представлены на рис. 2, где хорошо видны интервалы  $\dot{\gamma}$ , в которых наблюдаются положительные или отрицательные эффекты обработки (уменьшение или возрастание вязкости).

Данные рис. 2 показывают, что *положительный* эффект кратковременной ультразвуковой обработки наблюдается лишь при больших скоростях сдвига, при наличии в нефти *свободнодисперсной* системы микрогелевых частиц. Конкретной причиной снижения вязкости может быть ослабление каркаса микрогелевых дисперсных частиц, формируемых коллоидами асфальтенов.

Из рис. 2 видно также, что проявление *отрицательного* эффекта кратковременной ультразвуковой обработки наблюдается при малых скоростях сдвига, в условиях существования *связнодисперсной* системы микрогелевых частиц в нефти. Соответственно, вероятной причиной увеличения вязкости является появление добавочных связей между индивидуальными микрогелевыми частицами в результате воздействия ультразвука.

Непрерывное продолжительное воздействие ультразвуком малой мощности производилось на протяжении 3-х часов при комнатной температуре ( $24^\circ\text{C}$ ). Реологические исследования обработанного образца и контрольного образца исходной нефти проводили при  $10\text{--}60^\circ\text{C}$  (в условиях существования как «жидкоподобной», так и «твердоподобной» структуры исходной нефти).

Длительная ультразвуковая обработка также не

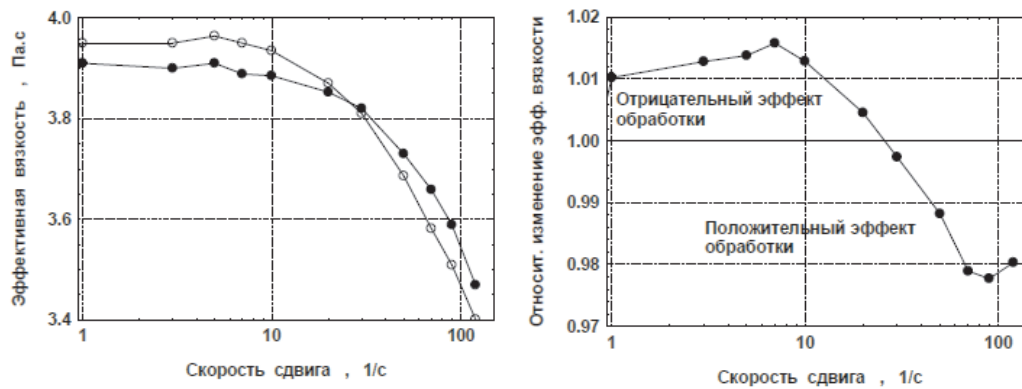


Рис. 2: Слева — влияние скорости сдвига на величину максимальной эффективной вязкости в образцах исходной (●) и обработанной (○) нефти. Справа — относительное изменение эффективной вязкости после кратковременной ультразвуковой обработки

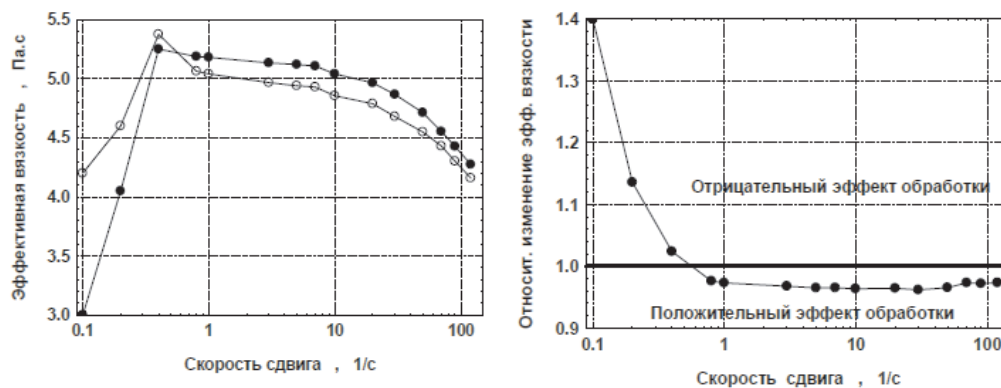


Рис. 3: Слева — влияние скорости сдвига на величину максимальной эффективной вязкости при 45 °С в образцах исходной (●) и обработанной (○) нефти. Справа — относительное изменение эффективной вязкости после длительной ультразвуковой обработки

приводит к *качественным* изменениям коллоидно-дисперсной структуры. Осцилляционный характер тиксотропии при малых  $\dot{\gamma}$  (0,08; 0,8 и 3,01/с) в обоих образцах свидетельствует о сохранении в них связнодисперсной «жидкоподобной» структуры. Схожими являются также процессы перехода к свobodнодисперсной структуре микрогелевых частиц при больших  $\dot{\gamma}$  (50 1/с).

Наши результаты вновь показывают, что даже после долговременной обработки возможны проявления *отрицательных* эффектов ультразвукового облучения — данные для  $\dot{\gamma} = 0,08$  1/с демонстрируют *увеличение* напряжения сдвига (и, соответственно, вязкости) в обработанном образце. Для выявления условий существования отрицательных эффектов обработки, как и выше, для каждого значения  $\dot{\gamma}$  были рассчитаны максимальные эффективные вязкости  $(\eta_{\text{эфф}})_{\text{макс}} = \tau_0/\dot{\gamma}$ , а также относительное изменение этого параметра после длительного ультразвукового облучения. Результаты расчетов показаны на рис. 3. Видно, что отличия от случая кратковременного облу-

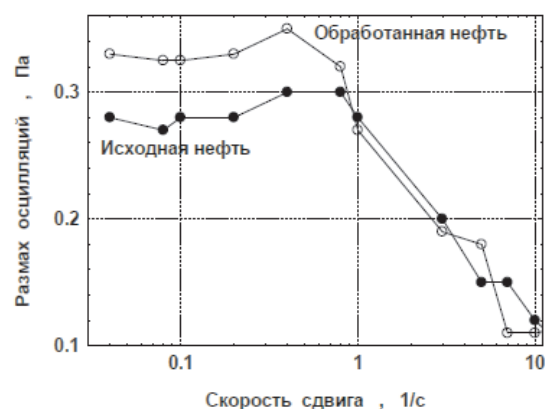


Рис. 4: Влияние скорости сдвига на размах осцилляций напряжения сдвига при 45 °С в образцах исходной нефти (●) и нефти, подвергнутой долговременной ультразвуковой обработке (○)

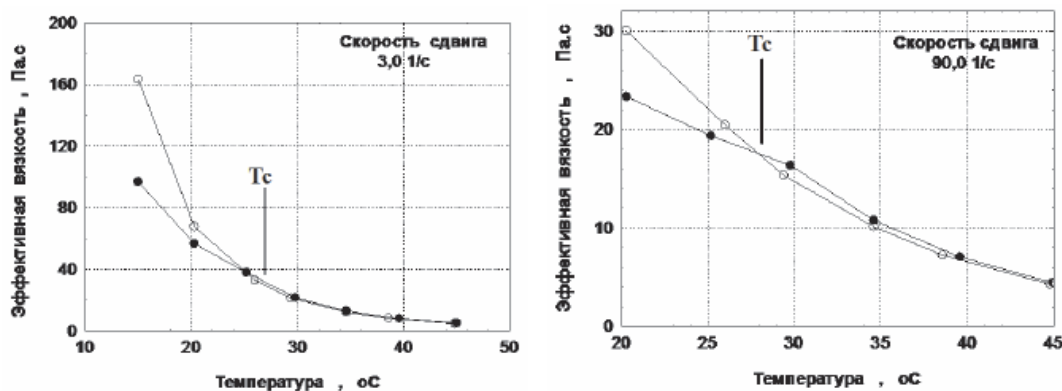


Рис. 5: Влияние температуры на эффективную вязкость при различных скоростях сдвига для образцов исходной нефти (●) и нефти, подвергнутой долговременной ультразвуковой обработке (○).  $T_c$  — температура фазового перехода от «твердоподобных» к «жидкоподобным» структурам нефти

чения (рис. 2) не являются принципиальными и состоят лишь в том, что отрицательные эффекты обработки (возрастание вязкости) наблюдаются при несколько меньших скоростях сдвига.

По результатам кратковременной ультразвуковой обработки был сделан вывод, что вероятной причиной возрастания вязкости является возникновение добавочных связей между микрогелевыми частицами. Этот вывод подтверждается и реологическими исследованиями нефти, подвергнутой долговременному ультразвуковому облучению. На рис. 4 показано влияние скорости сдвига на величину этого параметра осцилляций в обработанном и контрольном образцах нефти (при 45 °C). Приведенные данные наглядно демонстрируют увеличение энергии связей в области проявления отрицательного эффекта длительной ультразвуковой обработки.

В области существования «твердоподобных» структур нефти ( $T < T_c$ ) наблюдаются гораздо более выраженные эффекты обработки, чем в области существования «жидкоподобных» структур ( $T > T_c$ ). При рео-

логических исследованиях было установлено, что эти эффекты являются «отрицательными». Как видно из рис. 5, при  $T < T_c$  для любых скоростей сдвига наблюдается возрастание эффективной вязкости после длительной ультразвуковой обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные выше результаты показывают, что специфические воздействия маломощного ультразвукового облучения является благоприятным (приводит к снижению вязкости исследованной нефти) лишь при достаточно высоких температурах и больших скоростях сдвига. Последствия неспецифического (кавитационного) воздействия мощного ультразвукового облучения не могли быть исследованы в лабораторных условиях в связи с бурным выделением газов уже на первых секундах обработки образцов нефти.

Работа выполнена при финансовой поддержке ОАО «Татнефть» имени В. Д. Шашина.

- [1] Najafi SnI., Amani M. Advances in Petroleum Exploration and Development. **2**, N 2. P. 32. (2011).  
 [2] Mousavi S.M.R., Amani M., SnplaceNajafi SnI., Ghazanfari M.H. J. Energy Resour. Technol. **134**, N 2. P. 022001. (2012).  
 [3] Lionetto F., Coluccia G., D'Antona P., Maffezzoli A. Rheol Acta **46**. P. 601. (2007).

- [4] Евдокимов И.Н., Елисеев Н.Ю. Влияние термообработки ромашкинской нефти на реологические свойства. X Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ. Материалы конференции. С. 84. (Казань: Изд. «Бутлеровские сообщения», 2002).  
 [5] Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu., Eliseev D.Yu. Thermophysical properties and phase-behaviour of asphaltene-containing petroleum fluids. Fluid Phase Equilibria. **212**, Iss.1-2. P. 269. (2003).

## The change of rheological properties of high viscosity of the structured oil when ultrasonic processing

I. N. Evdokimov , N. Yu. Eliseev<sup>a</sup>, A. A. Fesan

*Department of Physics, Faculty of Development Oil and Gas Reservoirs, I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas,  
Moscow 119991, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>eliseev@gubkin.ru*

In the course of the research was conducted short-term and long-term ultrasonic treatment samples of high viscosity structured oil content of asphaltenes 15–16%. The results of measurements and calculations for short ultrasonic processing of high-viscosity oil show that the rheological dependencies there are intervals of shear rate, showing a decrease or increase in viscosity. Prolonged ultrasonic treatment does not lead to qualitative changes in the colloid-dispersed structure. After ultrasonic treatment of the structured oil can be observed as positive effects (reduced viscosity) and negative effects (increase in viscosity, precipitation, clogging of the pore space of the reservoir). For each case (individual type of oil, reservoir conditions, the power source of ultrasound), it is necessary to determine the appropriate processing time for achieving maximum positive effect.

PACS: 43.25.+y

Keywords: ultrasonic treatment, high viscosity structured oil, asphaltenes, colloid-dispersed structure.

Received 14.11.2014.

### Сведения об авторах

1. Евдокимов Игорь Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры физики; тел.: (499) 233-95-42, e-mail: physexp@gubkin.ru.
2. Елисеев Николай Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики; тел.: (499) 507-83-32, e-mail: eliseev@gubkin.ru.
3. Фесан Алексей Александрович — аспирант кафедры физики; тел.: (499) 233-95-42, e-mail: physics@gubkin.ru.